

## 第Ⅱ部門

## 地すべり起因の津波に対する VOF 法を用いた三次元数値解析法の適用性検証

京都大学工学部 学生員 ○浦上 佳太  
 京都大学防災研究所 正会員 米山 望

## 1. 研究の背景

津波はごく稀に地すべりによって発生することが知られているが、地震に起因する津波と比べて非常に発生頻度が低く、実態はあまり明らかになっていない。また、地すべり起因の津波を平面二次元で評価する手法はいくつか提案されているが、どのモデルも地すべりの様子を物理的に解析できていないため、伴って津波の評価も十分に精度が保証されていない。地すべり起因の津波を正確に評価するためには、三次元的な地すべり挙動を再現できるモデルの構築が必要である。

そこで本研究では、三次元津波漂流物挙動解析手法<sup>[1]</sup>を応用して、地すべり津波の再現を試みた。具体的には、藤井らの水理模型実験<sup>[2]</sup>の再現計算を行い、本解析手法の地すべり起因の津波に対する適用性を検証した。

## 2. 解析手法の概要

本研究で用いた解析手法では、地すべり塊を剛体と見なし、流体解析では、計算セルによって分割された断片（セグメント）として表現する。これにより、各計算セルの空隙率及び開口率を正確に計算して流体挙動の基礎方程式に反映させることで、流体と剛体の相互作用を考慮した数値解析が可能となる。以下では、流体挙動の解析及び地すべり塊挙動の解析について述べる。

## 2.1. 流体挙動の解析

流体解析は、自由水面の取り扱いには VOF 法、境界形状の取り扱いに FAVOR 法を用いた非圧縮流体解析手法で行った。以下に基礎方程式を示す。

## • 連続式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

• 運動方程式（Navier-Stokes 式）（ $i = 1, 2, 3$ ）

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

## • 流体体積の移流方程式

$$\frac{\partial \gamma^\nu F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^a F u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $u_i$ ：流速の各方向成分、 $\rho$ ：流体密度、 $p$ ：圧力、 $G_i$ ：単位質量あたり外力の各方向成分、 $\nu$ ：動粘性係数、 $\gamma^\nu$ ：計算セルの空隙率、 $\gamma_i^a$ ：計算セル境界の開口率、 $F$ ：計算セルの液体充填率である。以上の方程式を直交座標系上で離散化して解析を行う。各物理量の配置はスタッガード配置とし、離散化は時間について前進差分、移流項は三次精度風上差分、その他は中央差分とした。また、式(3)はドナーアクセプター法を用いて計算した。これに関して、流体体積を保存するための工夫が複数施されている。なお、本研究では、物体の移動を考慮しているため、計算セルの空隙率及び開口率が時間的に変化する。

## 2.2. 地すべり塊挙動の解析

地すべり塊を剛体として扱うことで、その運動は重心の並進運動と重心まわりの回転運動に分解できる。以下にそれぞれの運動方程式を示す。なお、剛体の回転は、剛体の重心を原点とした慣性主軸座標系上で計算する。

## • 重心の並進運動方程式

$$m \mathbf{a}_g = m \mathbf{g} + \sum_{segment} \mathbf{F}^{seg} + \mathbf{F}^{re} \quad (4)$$

## • 重心周りの回転運動方程式

$$\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\Phi} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I} = \mathbf{N} \quad (5)$$

ここで、 $m$ ：地すべり塊の質量、 $\mathbf{a}_g$ ：重心の加速度、 $\mathbf{F}^{seg}$ ：各セグメントに作用する流体粘性力及び圧力の合力、 $\mathbf{F}^{re}$ ：地面から受ける垂直抗力、 $\boldsymbol{\omega}$ ：慣性主軸まわりの角速度、 $\boldsymbol{\Phi}$ は慣性主軸まわりの角加速度、 $\mathbf{I}$ は主慣性モーメント、 $\mathbf{N}$ は慣性主軸まわりのモーメントである。

### 3. 水理模型実験に基づく検証

本研究では、複数の実験ケースに関して再現計算を行った。ここで一例を示す。

#### 3.1. 解析条件

本解析では、地すべり塊を模した形状を斜面上で落下させ、発生した津波の水位を評価した。解析領域の概要を図1に示す。メッシュサイズは  $x, z$  軸方向で共に  $0.01(\text{m})$ 、 $y$  軸方向  $0.05(\text{m})$  としている。なお、領域境界は4方向全て固定壁の条件となっていて、斜面と地すべり模型間の摩擦をゼロと仮定している。

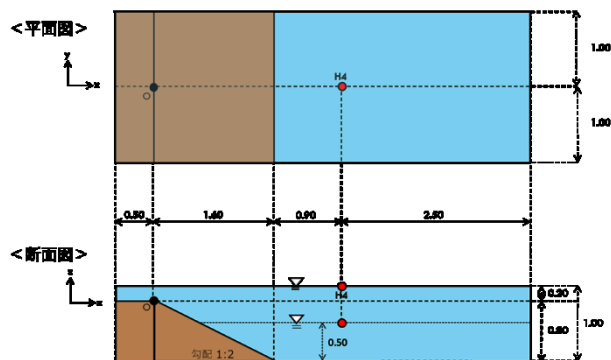


図1. 解析領域 (単位: m)

地すべり模型を図2に示す。比重は1.60である。これを斜面上端に合わせて配置し、加速度  $4.0(\text{m/s}^2)$  で等加速度運動させた。初期水位  $1.00(\text{m})$  に設定し、計算時間間隔  $0.010(\text{s})$ 、計算時間  $4.0(\text{s})$  で津波伝播計算を行い、発生した津波の

図2. 地すべり模型  
(単位: cm)

水位を図1で示されている計測点 H4 で評価した。なお、連続式誤差許容最大値  $1.0 \times 10^{-5}$ 、水の動粘性係数  $1.0 \times 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$  としている。

#### 3.2. 解析結果・考察

解析の様子を図3-1, 2, H4で計測した津波の水位変動を図4、解析結果・実験結果それぞれの第一波における最大・最小水位を表1に示す。

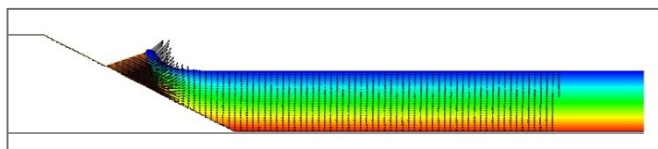


図3-1. 解析の様子 ( $t=0.53(\text{s})$ )

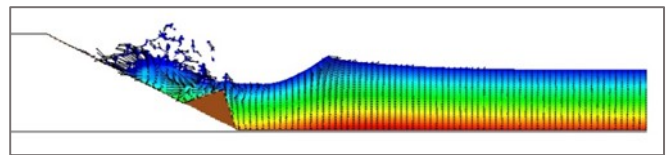


図3-2. 解析の様子 ( $t=1.44(\text{s})$ )

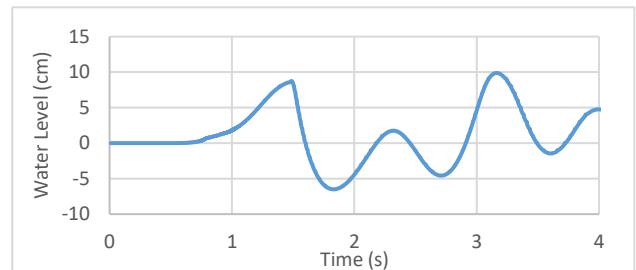


図4. 解析結果 (水位変動)

表1. 最大・最小水位の比較

|      | 最大水位<br>(cm) | 最小水位<br>(cm) |
|------|--------------|--------------|
| 解析結果 | 8.74         | -6.51        |
| 実験結果 | 9.60         | -9.23        |

解析結果の方が実験結果よりも全体的に小さく評価されているものの、その誤差は約1.10倍、1.42倍程度と概ね一致している。最小水位で比較的誤差が大きくなった原因としては、解析領域が実験水槽に比べて狭く、境界からの反射波の影響を受けたことが考えられる。以上より本解析手法が地すべり起因の津波を概ね良い精度で再現できることが言える。

### 4. 結論

本研究では、本解析手法を既往の水理模型実験に適用して再現計算を行い、解析結果と実験結果の比較・考察をすることによって、本解析手法の地すべり起因の津波への適用性を検証した。解析の結果、本解析手法が実現象を概ね正確に再現できることが考えられる。

#### 参考文献

- [1] 米山ら：複雑な移動・回転を考慮した津波漂流物の三次元数値解析手法の開発，2009。
- [2] 藤井ら：地すべりによる津波の平面水槽を用いた水理模型実験，2018。